

Научная статья
УДК 546.63'226+66.082.2:065.5
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.037

СЕЛЕКТИВНОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ СКАНДИЯ В УСЛОВИЯХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДВОЙНЫХ СУЛЬФАТОВ СО ЩЕЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ ИЛИ АММОНИЕМ

Лилия Александровна Пасечник

Институт химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия, pasechnik@ihim.uran.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0631-5287>

Аннотация

Приведены результаты поведения скандия в сульфатных системах, полученных при переработке красных шламов глиноземного производства. Показано, что кристаллизующийся в выбранных условиях сульфоскандат аммония $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ имеет большие перспективы в качестве гравиметрической формы. Осаждение $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ обладает высокой селективностью для отделения скандия от других распространенных компонентов растворов, о чем свидетельствуют высокие коэффициенты разделения скандия и другого металла $\beta_{\text{Sc/M}}$, например, для пары с алюминием $\beta_{\text{Sc/Al}} = 4280$. Дополнительно установлена возможность селективного осаждения менее растворимой двойной соли $\text{KSc}(\text{SO}_4)_2$. Продукт перекристаллизации и прокаливания содержит 99 % Sc_2O_3 .

Ключевые слова:

скандий, сульфаты, кристаллизация, селективность

Благодарности:

статья выполнена при поддержке федерального бюджета по теме государственного задания Института химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук № АААА-А19-119031890028-0.

Для цитирования:

Пасечник Л. А. Селективность осаждения скандия в условиях кристаллизации двойных сульфатов со щелочными металлами или аммонием // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 2. С. 197–202. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.037

Original article

SELECTIVITY OF SCANDIUM PRECIPITATION UNDER CONDITIONS OF CRYSTALLIZATION OF DOUBLE SULFATES OF ALKALI METALS OR AMMONIUM

Liliya A. Pasechnik

Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia, pasechnik@ihim.uran.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0631-5287>

Abstract

The results of the scandium behavior in sulfate systems obtained during the processing of alumina production red mud were presented. It is shown that ammonium sulfoscamdate $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ crystallizing under the chosen conditions has great prospects as a gravimetric form. The precipitation of $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ has a high selectivity in the separation of scandium from other components of solutions, as evidenced by the higher separation factors between scandium and impurities of the most common metals $\beta_{\text{Sc/M}}$ (for example, for a pair with aluminum $\beta_{\text{Sc/Al}} = 4280$). Additionally, the possibility of selective precipitation of a less soluble double salt $\text{KSc}(\text{SO}_4)_2$ has been established. The product of recrystallization and calcination contains 99% Sc_2O_3 .

Keywords:

scandium, sulfates, crystallization, selectivity

Acknowledgments:

the article was prepared with the support of the federal budget topic of the state assignment for The Institute of Solid State Chemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No АААА-А19-119031890028-0.

For citation:

Pasechnik L. A. Selectivity of scandium precipitation under conditions of crystallization of double sulfates of alkali metals or ammonium // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 2. P. 197–202. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.2.037

Введение

Целым рядом уникальных свойств — высокой механической прочностью, температурной устойчивостью, коррозионной и радиационной стойкостью — обладают скандийсодержащие сплавы, использующиеся уже в настоящее время в самых ответственных изделиях авиа- и космических аппаратов, в материалах реакторостроения и ядерной энергетики [1–3]. Различные соединения скандия являются перспективными компонентами новых составов высокотемпературной керамики, твердых электролитов, оптических материалов и систем памяти [4, 5].

Скандий, являясь рассеянным элементом, в природе содержится в очень незначительных количествах в рудах других металлов. Известные скандиеносные минералы являются промышленным источником таких элементов, как U, Al, Fe, Cr, Ni, Zr, Ti, W, Be, а также редкоземельных элементов (РЗЭ). Технологии попутного извлечения скандия уже в разных странах внедрялись при переработке руд урана, циркония, титана и вольфрама [6, 7], при этом в России долгое время производство скандия отсутствовало. В стадии разработки находятся варианты перспективных технических решений для потенциального источника скандия — красных шламов, отходов переработки бокситов на глинозем. Опубликованы данные о том, что ОК «РУСАЛ» на экспериментальном участке отрабатывает получение оксида скандия в качестве побочного продукта [8]. Опытная установка по экстракционному извлечению скандия из сернокислых растворов подземного выщелачивания урана введена в эксплуатацию компанией «Далур» в Курганской области [9]. Несмотря на уникальные свойства и появление собственных производств, масштабное использование скандия сдерживается его высокой стоимостью, что наталкивает на необходимость поиска дешевых и эффективных технологических процессов.

Целью данной работы является изучение возможности селективного осаждения скандия из многокомпонентных сернокислых растворов в виде двойных солей с одновалентными катионами. Кристаллизация двойных сульфатов РЗЭ является классическим методом их разделения. Этот метод разрабатывается для разделения РЗЭ по подгруппам и особенно удобен для концентрирования тяжелых лантаноидов из природных смесей, обогащенных лантаном, церием, неодимом и празеодимом, попутно с очисткой от примесей фосфора, титана, ниобия и других элементов. Изучение распределения индивидуальных элементов между осадком и раствором при их совместном присутствии, зависящее от растворимости и сокристаллизации, является необходимым этапом в обосновании выбранных параметров селективности. Стоит отметить, что сами по себе двойные сульфаты РЗЭ и щелочных металлов обладают не только высокой термической стабильностью, но и другими важными функциональными свойствами [10, 11]. При этом кристаллизующиеся из водных растворов координационные соединения обладают разнообразным гидратным составом и структурными характеристиками, а кристаллизационная вода может входить как во внешнюю, так и во внутреннюю координационную среду. Двойные сульфаты состава $MRE(SO_4)_2 \cdot nH_2O$ при соотношении $M : RE = 1 : 1$, где M — катион аммония или щелочного металла, RE — катион РЗЭ при $n \geq 0$, являются наиболее типичными для всех лантаноидов. Их гидрохимическое получение зачастую оказывается более энергосберегающим и менее продолжительным во времени по сравнению с твердофазными процессами с высокотемпературным нагревом исходных смесей оксидов.

Результаты

В ИХТТ УрО РАН разрабатываются научные основы переработки красных шламов с возможностью получения концентратов и продуктов как на основе макрокомпонентов (алюминия, железа, кремния), так и наиболее ценных редких металлов, в частности скандия, циркония, иттрия и др. Условия получения скандиевого и титан-циркониевого концентратов были отработаны в лабораторном масштабе и на ранее действовавшем опытном производстве в рамках договора с ИХТТ. Выщелачивание редких металлов из шлама заключается в обработке шламовой пульпы отходящими газами печей спекания с нейтрализацией щелочи шламовой пульпы и комплексованием в карбонатно-гидрокарбонатных растворах скандия и циркония. Гидролитически осажденный бедный скандиевый концентрат предложено перерабатывать по сернокислотной технологии с отделением от малорастворимых примесей кремния, кальция и др.

Ранее нами при разработке изоацидоциклического процесса отделения скандия от макроколичеств алюминия и железа были изучены фазовые равновесия в трех- и четырехкомпонентных сульфатных системах. Показано, что значения растворимости сульфатов алюминия и железа (II) значительно выше величины растворимости сульфата скандия. При этом введение дополнительного компонента в систему со скандием оказывает наибольшее высаливающее действие по сравнению с другими системами, так же как и повышение концентрации кислоты (рис. 1).

В системе сульфатов алюминия и железа (II) в области до 33 мас. % H_2SO_4 обнаружено образование в равновесной твердой фазе галотрихита — двойной соли состава $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$. Снижение растворимости в системе сульфатов Sc и Fe (II) установлено в значительно более высокой области кислотности вследствие кристаллизации комплексной соли, однако ее точный состав определить не удалось.

Таким образом, при повышении концентрации кислоты происходит последовательное осаждение сульфатов разного состава, а обедненный по солям крепкий сульфатный раствор может быть использован для вскрытия новой партии сырья — красного шлама.

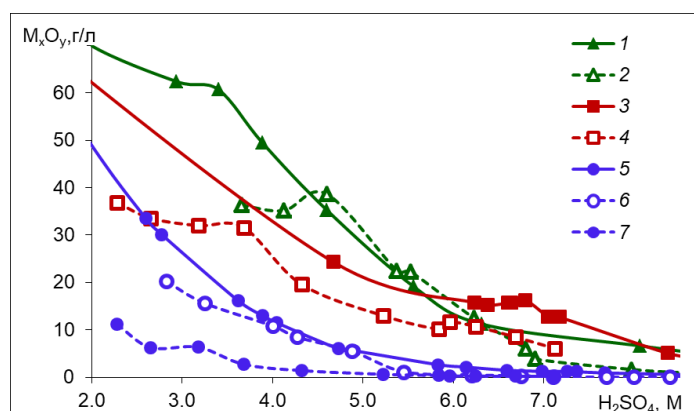


Рис. 1. Изотермы растворимости при 25 °С систем сульфатов: Fe (II) (1) и Fe (II) в присутствии Sc (2); Al (3) и Al в присутствии Sc (4); Sc (5), Sc в присутствии Fe (II) (6) и Sc в присутствии Al (7)

Ранее [12] осаждение скандия из сульфатных растворов путем подкисления было предложено для отделения от цветных металлов (Fe, Al, Mn) и группы РЗЭ (Th, Zr, Y, Yb). Авторами установлено, что из 10 н H_2SO_4 выход скандия в виде $\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ не превысил 50 %. Из раствора 24 н H_2SO_4 с выходом более 96 % происходило осаждение двойных солей неустоенного состава. Двойные сульфаты $\text{NaFe}(\text{SO}_4)_2$, $(\text{H}_3\text{O})\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$, $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2$, $\text{NaRE}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и другие вследствие более высокого содержания натрия в составах природного сырья и техногенных отходов были идентифицированы в качестве первичных продуктов при их кислотном выщелачивании или «сухой» сульфатизации [13].

Содержание основных компонентов сернокислого раствора вскрытия бедного скандиевого концентрата, полученного нами из раствора карбонатной обработки красного шлама, варьируется в следующих пределах, $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$: 3 — 5 Sc, 5 — 20 Zr, 1 — 6 Ti, 2 — 20 Fe(III), 3 — 8 Si и по < 1 Ca, Mg, Al и Na. Из такого достаточно бедного скандийсодержащего раствора для отделения от примесей металлов нами была предложена кристаллизация двойных солей скандия и аммония с высоким выходом и минимальной остаточной концентрацией скандия в фильтрате путем подкисления раствора в присутствии избытка ионов аммония [14]. Коэффициенты разделения скандия от основных металлов осаждением двойной соли состава $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ при использовании разных солей аммония и варьировании условий представлены в таблице. При концентрациях более 550 $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$ H_2SO_4 и более 2,0 моль $\cdot \text{л}^{-1}$ NH_4^+ в осадке $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ наблюдается появление в значительных количествах сульфата аммония или вводимой соли аммония, а также сульфатов примесных металлов, что не будет обеспечивать высокую степень разделения скандия и примесных металлов.

Условия и коэффициенты разделения скандия и металлов при кристаллизации $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$

H_2SO_4 , $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$	Состав соли	Sc, $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$		Выход Sc, %	Коэффициенты разделения				
		Исх.	Кон.		$\beta_{\text{Sc/Al}}$	$\beta_{\text{Sc/Fe}}$	$\beta_{\text{Sc/Ca}}$	$\beta_{\text{Sc/Ti}}$	$\beta_{\text{Sc/Zr}}$
500	NH_4Cl	1.0	0.010	98.4	3840	210	160	65	65
350	NH_4Cl	1.7	0.025	97.5	4300	200	95	80	105
450	NH_4Cl	1.7	0.020	98.6	4330	230	110	105	105
500	NH_4Cl	4.0	0.009	99.3	4540	260	130	105	95
350	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1.0	0.024	97.9	4330	240	70	75	100
450	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$	1.7	0.034	96.4	4330	190	90	105	105
Средние значения коэффициентов разделения					4280	220	110	90	95

Несмотря на то что сведения о существовании $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ были известны ранее, точных данных о структуре и свойствах не было установлено. Нами впервые были обнаружены две полиморфные

модификации $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ с необратимым фазовым переходом между ними и решена их структура. Изучена растворимость скандия в модельных системах в зависимости от концентрации кислоты в присутствии $0,5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$, т. е. в условиях кристаллизации двойной соли в технологии извлечения скандия (рис. 2, а). На СЭМ-изображении $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ (рис. 2, б) осажденного из реального раствора вскрытия концентрата видны хорошо окристаллизованные гексагональные слоистые призмы размером от 10–20 до 50 мкм. Образование такого высококристаллического осадка является положительным фактором при фильтрации и промывке в поточном технологическом процессе. Анализ EDX (рис. 2, в) показывает присутствие небольшого количества соосажденных в неоптимальных условиях примесей Ca и Zr наряду с основными элементами O, S и Sc. Выдержка осадка двойного сульфата в маточном растворе около суток позволяет снизить потери скандия с фильтратом и повысить эффективность извлечения. При более продолжительной кристаллизации в присутствии высоких содержаний примесей металлов наблюдается одновременное осаждение простых и двойных сульфатов Ca, Na, Al, Fe и т. д. Повторная перекристаллизация позволяет провести очистку, а последующая прокалка — получить 99,0 % Sc_2O_3 . В целом воспроизводимость точного качественного и количественного составов продукта кристаллизации показывает, что сульфоскандат аммония имеет большие перспективы в качестве гравиметрической формы для количественного осаждения скандия из растворов и отделения от наиболее распространенных примесных металлов.

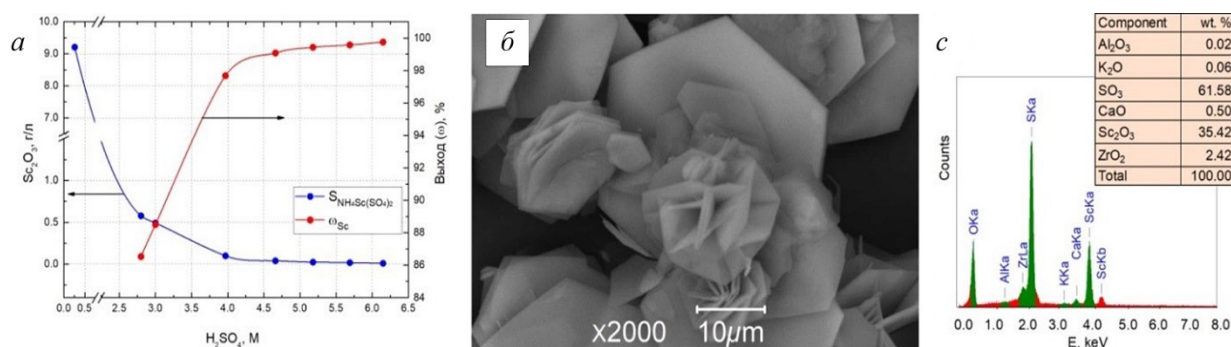


Рис. 2. $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$:

а — зависимости растворимости скандия и его выхода в осадок от концентрации H_2SO_4 в модельной системе в присутствии $0,5 \text{ моль} \cdot \text{л}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$ при 25°C ; б — СЭМ-изображение; в — EDX-анализ продукта, осажденного из раствора вскрытия скандиевого концентрата

Перспективным может оказаться близкий по составу $\text{KSc}(\text{SO}_4)_2$, который также показывает малую растворимость в воде, равную $0,45 \text{ мас. \% } \text{Sc}_2\text{O}_3$, при 20°C . Ранее кристаллизация $\text{K}_3\text{Sc}(\text{SO}_4)_3$ с эффективностью осаждения $98,26 \text{ \%}$ была предложена для отделения от иттрия, эрбия и иттербия [15]. Однако растворимость соединения состава $\text{K}_3\text{Sc}(\text{SO}_4)_3$, определенная только в насыщенном водном растворе K_2SO_4 , оказывается достаточно высокой и составляет $\sim 1,5 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1} \text{ Sc}_2\text{O}_3$. Таким образом, подобно $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$, кристаллизация $\text{KSc}(\text{SO}_4)_2$ может быть эффективно использована в технологии отделения и концентрирования скандия.

Соли натрия, как наиболее близкие глиноземному производству, были предложены для осаждения скандия из значительно более концентрированных по скандию растворов при переработке скандиевого концентрата [16]. По патенту скандиевый концентрат растворяют в серной кислоте при pH 1,5–3,0 и введением $200\text{--}300 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4$, отделяют скандий осаждением двойной соли сульфата натрия и скандия от растворимых примесей (титана, циркония и алюминия) при охлаждении системы с температуры 90 до 60°C . Двойную соль снова растворяют в воде и добавлением соли бария удаляют соосажденные со скандием примеси (железа III). Из скандиевого раствора осаждают гидроксид скандия при pH 4,8–6,0 и температуре $40\text{--}100^\circ\text{C}$ для отделения от других более растворимых РЗЭ. Конверсией гидроксида скандия в оксалат в насыщенном растворе щавелевой кислоты при $40\text{--}100^\circ\text{C}$ в течение 1–6 ч и последующей прокалкой получают оксид скандия чистотой $99,3 \text{ \%}$. Только многоступенчатость процесса и необходимость использования разнообразных по составу и свойствам соединений и сред позволили авторам провести очистку и отделение скандия от других металлов. При этом исходное содержание скандия в концентрате должно быть достаточно высоким, в частности, использован концентрат состава, мас. %: $32,4 \text{ Sc}_2\text{O}_3$, $7,8 \text{ ZrO}_2$, $1,7 \text{ Fe}_2\text{O}_3$, $0,67 \text{ TiO}_2$ и $0,28 \text{ Al}_2\text{O}_3$ при влажности $49,3 \text{ \%}$. Стоит заметить, что в присутствии

натрия из раствора кристаллизуется совершенно другой состав двойной соли $\text{Na}_3\text{Sc}(\text{SO}_4)_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$. Существенным недостатком этого кристаллогидрата является высокая растворимость в воде, которая повышается с 1,5 почти до 3,5 г·л⁻¹ Sc_2O_3 с ростом температуры от 20 до 100 °С, что снизит эффективность извлечения скандия при осаждении из бедных растворов.

При соосаждении скандия в присутствии РЗЭ (европия и эрбия) была изучена возможность получения допированных сульфоскандатов. В результате был получен $(\text{NH}_4)_3\text{Sc}_{0,995}\text{Eu}_{0,005}(\text{SO}_4)_3$, который, так же как недопированный состав, обладает полиморфным переходом при 81,6 °С. Это свойство позволило предложить его в качестве материала люминофора для бесконтактного определения температуры в области 50–100 °С. Расчетными методами доказано, что различие в ионных радиусах Sc^{3+} и Eu^{3+} , а также формирование полиэдров европия с координационными числами 7 и 9 (EuO7 и EuO9) в низко- и высокотемпературных модификациях соответственно, отличных от строго октаэдрического окружения скандия в ScO_6 , существенно ограничивают степень допирования [17]. Коэффициенты относительной и абсолютной чувствительности определения температуры (при облучении лазером $\lambda_{\text{ex}} = 248 \text{ нм}$) оказались высокими, при этом наблюдалась воспроизводимость измерений при многократном термоциклировании. Для менее насыщенного состава $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$, обладающего меньшим свободным объемом межслоевого пространства, степень допирования была значительно ниже, что подтверждает высокую селективность кристаллизации скандия.

Выводы

Предложена сернокислотная технология переработки скандийсодержащего концентрата с осаждением двойных солей аммония и щелочных металлов, которые являются дешевым сырьем химической промышленности, что позволит улучшить технико-экономические характеристики производства скандия. Проведено сравнение селективности кристаллизации различных составов сульфоскандатов в зависимости от состава одновалентного катиона для отделения от примесей других металлов, оценена полнота осаждения скандия в виде двойных солей. Для аммонийного состава $\text{NH}_4\text{Sc}(\text{SO}_4)_2$ при моделировании многокомпонентных сульфатных систем и изучении растворимости и распределения элементов между раствором и осадком определены наиболее перспективные условия кристаллизации соли с последующим получением 99 % оксида скандия.

Список источников

1. Røyset J. Scandium in aluminium alloys overview: physical metallurgy, properties and applications // J. Met. Sci. Technol. 2007. V. 25. P. 11–21.
2. Илларионов Е. И., Колобнев Н. И., Горбунов П. З. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике. М.: Наука, 2001. 192 с.
3. Sahlberg M., Zlotea C., Latroche M., Andersson Y. Fully reversible hydrogen absorption and desorption reactions with $\text{Sc}(\text{Al}_{1-x}\text{Mg}_x)$, $x = 0.0, 0.15, 0.20$ // J. Solid State Chem. 2011. V. 184 (1). P. 104–108.
4. Markov A. A., Patrakeev M. V., Kharton V. V., Pivak Y. V., Leonidov I. A., Kozhevnikov V. L. Oxygen Nonstoichiometry and Ionic Conductivity of $\text{Sr}_3\text{Fe}_{2-x}\text{Sc}_x\text{O}_{7-\delta}$ // Chem. Mater. 2007. V. 19. P. 3980–3987.
5. Baklanova I. V., Krasil'nikov V. N., Perelyaeva L. A., Gyrdasova O. I. Preparation, morphology, and luminescent properties of europium-doped nanodispersed scandium sesquioxide // Russ. J. Inorg. Chem. 2012. V. 57. P. 1529–1534.
6. Pasechnik L. A., Skachkov V. M., Chufarov A. Yu., Suntsov A. Yu., Yatsenko S. P. High purity scandium extraction from red mud by novel simple technology // Hydrometallurgy. 2021. V. 202. Art. 105597.
7. Комиссарова Л. Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 512 с.
8. Daniel J. Cordier U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. 2022. P. 146–147.
9. Smyshlyaev D., Kirillov E., Kirillov S., Bunkov G., Rychkov V., Botalov M., Taukin A., Yuldashbaeva A., Malyshev A. Recovery and separation of Sc, Zr and Ti from acidic sulfate solutions for high purity scandium oxide production: Laboratory and pilot study // Hydrometallurgy. V. 211. 2022. Art. 105889.
10. Локшин Э. П., Тареева О. А. Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 268 с.
11. Zhai B., Li Z. Y., Zhang C., Zhang F. L., Cao G. X., Li S. Z., Yang X. Y. Three rare Ln-Na heterometallic 3D polymers based on sulfate anion: syntheses, structures, and luminescence properties // Inorg. Chem. Commun. 2016. V. 63. P. 16–19.
12. Комиссарова Л. Н., Шацкий В. М., Моисейченко Г. И. Термическая устойчивость сульфатов скандия и их растворимость в растворах серной кислоты при 25 °С // Журн. неорганической химии. 1965. Т. 10, № 4. С. 755–763.
13. Zhang Y., Zhao H., Sun M., Zhang Y., Meng X., Zhang L., Lv X., Davaasambu S., Qiu G. Scandium extraction from silicates by hydrometallurgical process at normal pressure and temperature // J. Mater. Res. Technol. 2020. V. 9 (1). P. 709–717.
14. Pasechnik L. A., Skachkov V. M., Chufarov A. Yu., Suntsov A. Yu., Yatsenko S. P. High purity scandium extraction from red mud by novel simple technology // Hydrometallurgy, 2021. V. 202, Art. 105597.
15. Волков В. П., Гушин А. П., Соловьев Б. А. и др. Способ разделения скандия и редкоземельных элементов: Патент РФ № 2079431. 1997.

16. Козырев А. Б., Вишняков С. Е., Петракова О. В. и др. Способ получения оксида скандия из скандий-содержащих концентратов: Патент РФ № 2669737. 2018.
17. Pasechnik L. A., Peshehonova A. O., Lipina O. A., Medyankina I. S., Enyashin A. N., Chufarov A. Yu., Tyutyunnik A. P. Co-crystallization of red emitting $(\text{NH}_4)_3\text{Sc}(\text{SO}_4)_3\text{:Eu}^{3+}$ microfibers: structure-luminescence relationship for promising application in optical thermometry // *CrystEngComm*. 2022. V. 24. P. 4819–4830.

References

1. Røyset J. Scandium in aluminium alloys overview: physical metallurgy, properties and applications. *J. Met. Sci. Technol*, 2007, vol. 25, pp. 11–21.
2. Illarionov E. I., Kolobnev N. I., Gorbunov P. Z. *Alyuminiyevye splavy v aviakosmicheskoi tekhnike* [Aluminium alloys in aerospace engineering]. Moscow, Nauka, 2001, 192 p. (In Russ.).
3. Sahlberg M., Zlotea C., Latroche M., Andersson Y. Fully reversible hydrogen absorption and desorption reactions with $\text{Sc}(\text{Al}_{1-x}\text{Mg}_x)$, $x = 0.0, 0.15, 0.20$. *J. Solid State Chem.*, 2011, vol. 184, no 1, pp. 104–108.
4. Markov A. A., Patrakeev M. V., Kharton V. V., Pivak Y. V., Leonidov I. A., Kozhevnikov V. L. Oxygen Nonstoichiometry and Ionic Conductivity of $\text{Sr}_3\text{Fe}_2\text{-xSc}_x\text{O}_7\text{-}\delta$. *Chem. Mater.*, 2007, vol. 19, pp. 3980–3987.
5. Baklanova I. V., Krasil'nikov V. N., Perelyaeva L. A., Gyrdasova O. I. Preparation, morphology, and luminescent properties of europium-doped nanodispersed scandium sesquioxide. *Russ. J. Inorg. Chem.*, 2012, vol. 57, pp. 1529–1534.
6. Pasechnik L. A., Skachkov V. M., Chufarov A. Yu., Suntsov A. Yu., Yatsenko S. P. High purity scandium extraction from red mud by novel simple technology. *Hydrometallurgy*, 2021, vol. 202, art. 105597.
7. Komissarova L. N. *Neorganicheskaya i analiticheskaya khimiya skandiya* [Inorganic and analytical chemistry of scandium]. Moscow, Editorial URSS, 2001, 512 p. (In Russ.).
8. Daniel J. Cordier U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2022, pp. 146–147.
9. Smyshlyaev D., Kirillov E., Kirillov S., Bunkov G., Rychkov V., Botalov M., Taukin A., Yuldashbaeva A., Malyshev A. Recovery and separation of Sc, Zr and Ti from acidic sulfate solutions for high purity scandium oxide production: Laboratory and pilot study. *Hydrometallurgy*, 2022, vol. 211, art. 105889.
10. Lokshin E. P., Tareeva O. A. *Razrabotka tekhnologii izvlecheniya redkozemel'nykh elementov pri sernokislotoi pererabotke khibinskogo apatitovogo kontsentrata na mineral'nye udobreniya* [Technologies development for the extraction of rare earth elements while sulfuric acid processing of the Khibiny apatite concentrate for mineral fertilizers production]. Apatity, Kol. Nauchn. Tsentr Ross. Akad. Nauk, 2015, 268 p. (In Russ.).
11. Zhai B., Li Z. Y., Zhang C., Zhang F. L., Cao G. X., Li S. Z., Yang X. Y. Three rare Ln-Na heterometallic 3D polymers based on sulfate anion: syntheses, structures, and luminescence properties. *Inorg. Chem. Commun.*, 2016, vol. 63, pp. 16–19.
12. Komissarova L. N., Shatsky V. M., Moiseenko G. I. Termicheskaya ustojchivost' sul'fatov skandiya i ih rastvorimost' v rastvorah sernoj kisloty pri 25 °C [Thermal stability of scandium sulfates and their solubility in sulfuric acid solutions at 25 °C]. *Zhurn. neorgan. himii* [J. Inorg. Chem.], 1965, vol. 10 (4), pp. 755–763. (In Russ.).
13. Zhang Y., Zhao H., Sun M., Zhang Y., Meng X., Zhang L., Lv X., Davaasambuu S., Qiu G. Scandium extraction from silicates by hydrometallurgical process at normal pressure and temperature. *J. Mater. Res. Technol.*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 709–717.
14. Pasechnik L. A., Skachkov V. M., Chufarov A. Yu., Suntsov A. Yu., Yatsenko S. P. High purity scandium extraction from red mud by novel simple technology. *Hydrometallurgy*, 2021, vol. 202, art. 105597.
15. Volkov V. P., Gushchin A. P., Solov'ev B. A. et al. *Sposob razdeleniya skandiya i redkozemel'nykh elementov* [Method for separation of scandium and rare-earth elements]. RF Patent 2079431 (publ. 1997). (In Russ.).
16. Kozыrev A. B., Vishnyakov S. E., Petrakova O. V. et al. *Sposob polucheniya oksida skandiya iz skandij-soderzhashchih koncentratov* [Method of obtaining scandium oxide from scandium-containing concentrates]. RF Patent 2669737 (publ. 2018). (In Russ.).
17. Pasechnik L. A., Peshehonova A. O., Lipina O. A., Medyankina I. S., Enyashin A. N., Chufarov A. Yu., Tyutyunnik A. P. Co-crystallization of red emitting $(\text{NH}_4)_3\text{Sc}(\text{SO}_4)_3\text{:Eu}^{3+}$ microfibers: structure-luminescence relationship for promising application in optical thermometry. *Cryst. Eng. Comm.*, 2022, vol. 24, pp. 4819–4830.

Информация об авторе

Л. А. Пасечник — кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник.

Information about the author

L. A. Pasechnik — PhD (Chemistry), Leading researcher.

Статья поступила в редакцию 31.01.2023; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 01.02.2023.
The article was submitted 31.01.2023; approved after reviewing 31.01.2023; accepted for publication 01.02.2023.